

姿态控制飞轮机械参量的测定

干东英

现代卫星姿态控制飞轮在装配过程和正式使用前都要进行严格的各项空间环境模拟试验和各种机、电参量的测定,用以提高运转精度与可靠度。本文介绍了近年来国外有关飞轮各种机械参量的测试方法,以供研制飞轮者参考。

一 用起动法求惯量

在轴自由端组装上一个固定转筒2,转筒2的已知惯量为 J_0 ,欲研究的带转筒的转子1由绕线带动转动(见图1),绕线经过滑轮3,在其端部有重量 G ,在落下质量 $m = \frac{C}{g}$ 作用下带被试转子转动,并逐渐加速其运动,初始条件为:

$$t = 0, Z = H, v = 0, G = G_1$$

$$Z = H = \frac{1}{2} a_1 t_1^2 \quad \text{得} \quad a_1 = \frac{2H}{t_1^2}$$

用另一重量 G_2 作第二个试验得: $a_2 = \frac{2H}{t_2^2}$ 。

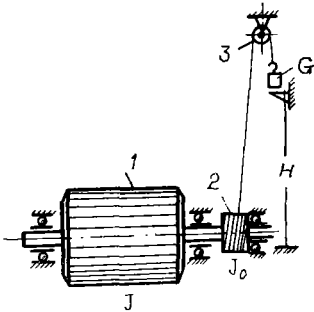


图1 用起动法求飞轮转动惯量装置图

$$G_1 = \left[m_1 + \frac{J + J_0}{r^2} \right] a_1 + \frac{M_T}{r},$$

$$G_2 = \left[m_2 + \frac{J + J_0}{r^2} \right] a_2 + \frac{M_T}{r}$$

M_T ——摩擦力矩,

r ——转筒2的半径。

消去 M_T 求转子(或杆件)转动惯量 J

$$J = \frac{G_1 \left(1 - \frac{a_1}{g} \right) - G_2 \left(1 - \frac{a_2}{g} \right)}{a_1 - a_2} r^2 - J_0.$$

应当指出,可用同一装置求 J_0 ,即无转子惯量 J 时,

$$J_0 = \frac{\left[G_1 \left(1 - \frac{a_1}{g} \right) - G_2 \left(1 - \frac{a_2}{g} \right) \right] r^2}{a_1 - a_2}$$

起动法也常用于求重杆件具有水平轴的惯量,若所研究的杆件有滚珠轴承,则试验可直接在机器上进行。

二 用滑行法求滚珠轴承的摩擦力矩

飞轮中的滚珠轴承转化摩擦系数与油的绝对粘度、单位压力、润滑层厚度、温度、摩擦副相对结构尺寸和轴承表面状态有关。

用滑行法可以求出上述诸因数所形成的动态摩擦力矩。在摩擦离合器脱开以后,由于在轴承中的摩擦力和相对的风阻,带飞轮的轴速度开始减小,直到停止。这个轴运动期间叫滑行期或停止期。转动系统运动能的储量为:

$$E_0 = \frac{J \omega_0^2}{2} = \frac{\pi^2}{1800} J n_0^2$$

此处 J ——带飞轮在内的转动惯量;

ω (弧度/秒)、 n (转/分)——转动速度;

在测量不同时间的瞬时角速度 ω_i (或 n_i)以后可以建立线图(见图2) $\omega_i = f(t)$ 或

$$n_i = f(t).$$

转动系统运动方程式可以由能与功的微量变化的相等条件而得 $dE = dA_T$

此处: A_T ——在轴承中摩擦力所作功(风阻忽略不计).

$$\begin{aligned} \text{将 } dE \text{ 和 } dA \text{ 代入 } J\omega_i d\omega_i &= M_T d\varphi_i \\ &= M_T \omega_i dt. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{由此得瞬时摩擦力矩 } M_T &= J \frac{d\omega_i}{dt} = \\ &= \frac{\pi}{30} J \frac{dn_i}{dt}. \end{aligned}$$

若用实验法求出 $\omega_i = f(t)$ 线图关系, 则

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\mu_\omega}{\mu_t} \frac{dy}{dt} = \frac{\mu_\omega}{\mu_t} \operatorname{tg} \beta = \frac{M_T}{J};$$

$$M_T = J \frac{\mu_\omega}{\mu_t} \operatorname{tg} \beta.$$

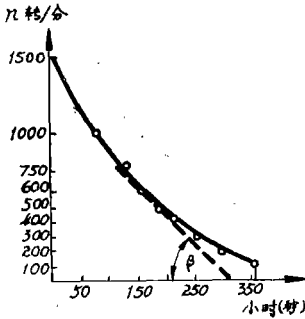


图2 飞轮滑行期速度线图

此处: β ——切线与轴 x 倾角;

μ_ω 及 μ_t ——按相应坐标轴所得系数;

将 $M_T = f^* P \gamma$ 代入, 可得转化摩擦系数瞬间值

$$\begin{aligned} f^* &= \frac{J}{pr} \frac{d\omega}{dt} \\ &= \frac{\mu_\omega}{\mu_t} \cdot \frac{J}{pr} \operatorname{tg} \beta \end{aligned}$$

式中: P ——轴承中正压力

r ——轴承半径.

三 确定飞轮轴承组中轴承跑合时间和跑合特性

在某一特定速度下, 驱动马达的功耗与轴承摩擦力矩成比例, 为确定直至稳态时轴

承中油分布对摩擦力矩的影响, 所以在轴承跑合时, 要对马达功耗进行测量和记录。一般来说, 轴承运转时的不正常现象主要是由于润滑、装配、和轴承质量所引起的。试验程序如下:

1. 测量在飞轮最高转速下(如3000转/分)的马达电流值, 在开始试验阶段, 每

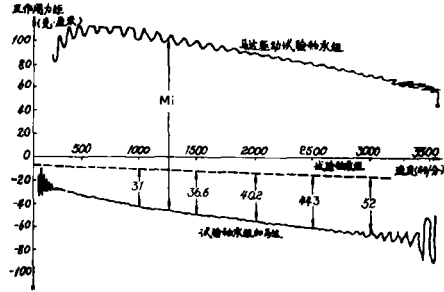


图3 马达驱动试验轴承组时的启动和滑行曲线

试验轴承组在3000转/分时的摩擦力矩

$$= 15 \text{ 克} \cdot \text{厘米}$$

马达损失力矩(在 $n = 3000$ 转/分时马达损失

$$= 1.64 \text{ 瓦}); 52 \text{ 克} \cdot \text{厘米}$$

$$U = 19 \text{ 伏}$$

$$I = 126 \text{ 毫安}$$

速度 = 3000 转/分

$$M_i = 133 \text{ 克} \cdot \text{厘米 (内马达力矩)}$$

$$I_{\text{马达电流}} = 260 \text{ 毫安}$$

$$\text{马达力矩/毫安} = M_i / I_{\text{马达}} = 0.531 \text{ 克} \cdot \text{厘米/毫安}$$

$$\cdot \text{厘米/毫安}$$

天记录两次, 经过50小时操作以后, 每天记录一次, 此试验一直进行到马达电流保持常值。(见图3)

2. 记录滑行曲线: 一次是记录马达转子与试验轴承相连时的滑行曲线, 一次是试验轴承与马达在高速下脱开后的轴承滑行曲线, 二曲线之差示出马达损失力矩(见图3、图4)。

3. 用额定转速(图中为3000转/分)时的电机额定力矩除以马达电流, 就可得到马达力矩常数如

$$\text{马达力矩常数} = \frac{M_i}{I}$$

$$= 0.531 \text{ 克} \cdot \text{厘米/毫安}.$$

施加的电源电压乘以所测马达电流与操作时间的关系曲线减去在每一单测点上的马达功耗就可得到每点上轴承摩擦功耗(见图5)。马达电流(毫安)乘以力矩常数(克·厘米/毫安)减去马达损失力矩(克·厘米)得到轴承摩擦力矩(克·厘米)。(见图6)。

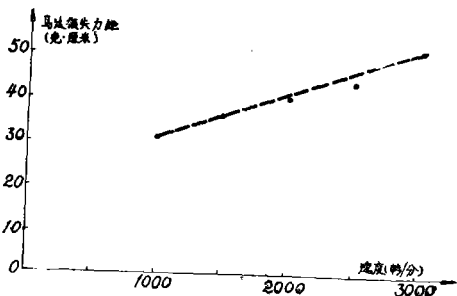


图4 为速度函数的马达损失力矩

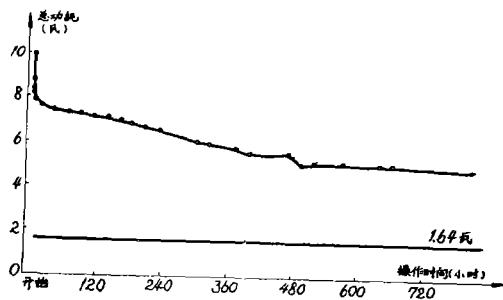


图5 电机总功耗图

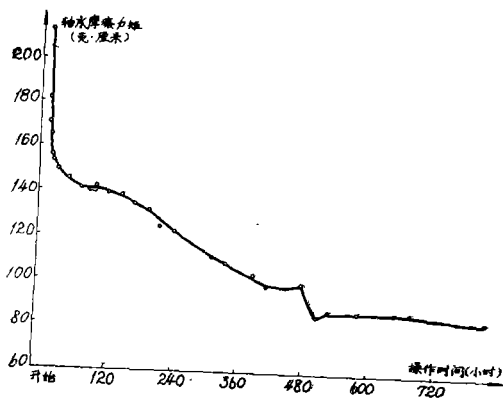


图6 轴承动态摩擦力矩

在跑合初期、轴承组中摩擦力矩有较大下降,在500小时以后,轴承跑合。在进一步操作时,摩擦力矩非常微小地继续下降。由

于飞轮所用油有较高粘度,所以飞轮轴承跑合时间要长一些。轴承是否早期失效,表现在电流是否升到电源电流上限大小。

四 测量在规定温度范围内,轴承组的摩擦力矩和功耗与润滑油粘度的关系

由于飞轮是在卫星的姿态控制仓中运转的,有一定的温控调节,所以在“交响乐”通讯卫星试验程序中规定,轴承组在+50℃下在试验器中至少运转10小时,然后在速度 $n = 3000$ 转/分下测量马达电流。在马达运转时,温度降至-5℃,在5小时以后,再测马达电流,从所测马达电流值计算出轴承摩擦力矩。由于润滑油粘度随温度变化,所以在-5℃时摩擦力矩增加,而在+50℃时减小。如在某组试验中飞轮动态摩擦力矩与所使用的KG-80润滑油粘度及温度的关系为:

温度 (℃)	粘度系数 (厘沲)	摩擦力矩 (克·厘米)
-5℃	4500	123
+28℃	250	81
+50℃	90	107

也就是说,在上述温度范围内,粘度变化50倍,而滚珠轴承在所选择润滑油中有相对的较小摩擦力矩变化,仅为粘度变化的1/25。另外,如轴承与轴的安装及轴承与飞轮其他部件的安装关系等都影响摩擦力矩的变化和大小。在另一组试验中,使用润滑油SRG-60时,其粘度系数与摩擦力矩随温度变化为:

温度 (℃)	粘度系数 (厘沲)	摩擦力矩 (克·厘米)
0℃	1500	106
+28℃	110	68
+50℃	43	67

在大多数情况下，摩擦力矩与温度的关系和粘度与温度的关系相同，而在滚珠轴承长时间跑合以后，油分布的改进可能导致摩擦力矩的改善。

五 测量润滑油油膜

必须防止充有润滑油的轴承即使在最高温度下发生在滚珠和滚道间有金属直接接触。此处必须有足够的润滑油膜。润滑油膜的丧失甚至失稳将造成混合摩擦，其磨损将导致过早地结束卫星的寿命。这项试验的目的是测量在规定的运转速度范围和在最可能温度限度内存在的有效润滑油膜。在滚珠轴承内、外环上附加一个电触点，以供给其转动部分以电流，用补偿电阻形成一个分压器，以将定电压加在轴承组上（见图7）。

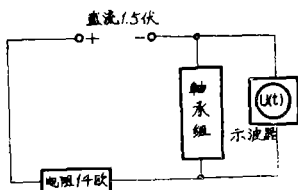


图7 轴承组中润滑油膜测试装置示意图

当温度增加时，由于润滑油粘度减小，因而EHD膜厚减小，欧洲空间研究与技术中心是在+23℃和+55℃温度下测试SRG-60和KG-80润滑油油膜的。示波器波形图表明，当使用KG-80润滑油时，在23℃下，一般轴承中在很低速度下就产生润滑油膜，在 $n = 60$ 转/分时仅看到有几个断点。在 $n = 3000$ 转/分时没有测量到短路，在55℃下仅在小于60转/分时才有金属接触，在600转/分时就获得完全的EHD膜。当使用SRG-60润滑油时，在55℃在 $n = 60$ 转/分时，产生的EHD膜是非常不足的，在600转/分时才完全产生。试验结果表明，在示波器上显示短路时间小于10%时，就可以保证飞轮作寿命试验。

六 润滑油储油器的研究

轴承本身不能保证在整个卫星运行期间存有足够量的润滑油，所以在轴承组的轴承中间装一个润滑油储存器，特别在飞轮壳体有裂纹时，储存器是极端重要的，在这种情况下，由于润滑油储油器的中间作用和迷宫式密封，润滑油以气体状态不断供到轴承中去，使能在轴承组中长期保持着润滑油的蒸汽压力。这样，壳体的漏裂状态就不意味着卫星寿命的终结。为了保证储油器在整个飞轮运转期间正常工作就要事先进行模拟试验，使其一直以低速连续供应液态润滑油。储油器要设计得在飞轮储存期内要避免润滑油流出，在卫星运行初期润滑油流出率最小，在几个月以后，在整个卫星运行期间就产生恒流的润滑油。因为影响自储油器中流出的油量的因素很多，因之这些参数要分开加以研究，（如：小孔设计、油脂容器材料、转动速度、温度、润滑油型号等）以对于不同设计建立不同计算方法（见图8、9。）

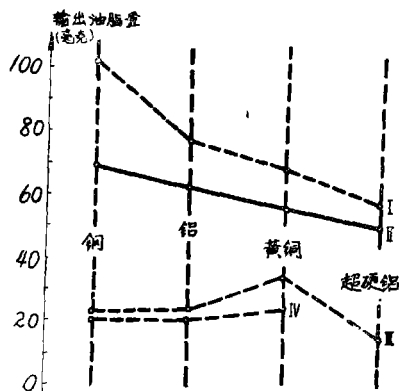


图8 用不同油脂室材料时油的流出量（在已知时间 t_0 内）曲线 I II—油脂 KG-80，使用转速 $n = 6000$ 转/分，杆臂长 = 105毫米、曲线 III IV—油脂 KG-80，使用转速 $n = 6000$ 转/分，杆臂长 = 35毫米

（注：在曲线 III 中时间为 $1.3t_0$ 。）

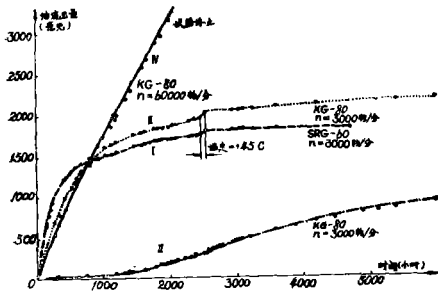


图9 为时间函数的输油量曲线

- 曲线 I: 试验初, 尼龙筒浸满 SRG—60 1015毫克, 油室充满SRG—60, 在 $n = 3000$ 转/分 2460 小时后储油器在 $t = +45^{\circ}\text{C}$ 下运转65 小时
- 曲线 II: 试验初, 尼龙筒浸满 KG—80 841毫克, 油室充满KG—80, 在 $n = 300$ 转/分2460小时后储油器在 $t = +45^{\circ}\text{C}$ 下运转65小时 (油孔面积为曲线 III 的 2.5 倍)
- 曲线 III: 试验初, 尼龙筒浸满 KG—80 309毫克, 油室充满KG—80, 在 $n = 300$ 转/分下测量流出量
- 曲线 IV: 试验初, 尼龙筒浸满 KG—80 663毫克, 油室充满KG—80在 $n = 6000$ 转/分下测量流出量

七 确定与限定轴承预载值

为了使轴承在飞轮运转时有良好的性能和长寿命, 轴承预载值不得选择得大到在发射阶段能使轴承完全卸载的值, 在确定预载的标准时, 选择使其有最小的摩擦力矩。在确定摩擦力矩 (为速度的函数) 的曲线族时, 将预载作为参数, 预载值选择得比其具有最小摩擦力矩时之值要略为高一点, 此预载值保证能使润滑油膜将滚动元件与滚道分开, 以避免金属接触和造成磨损和污染。在进行预载试验时, 将飞轮轴承组装在刚性支架上, 并由无刷直流电机驱动, 当马达功率损

失为已知时, 马达功耗指示滚珠轴承摩擦力矩。为避免在轴承内、外环上用不同间隔套筒加载会引起过量的作用力, 国际上一般趋向于刚性波纹管式弹簧代替套筒进行试验。为此目的, 采取以下步骤。

1. 确定轴承副的弹性特性, 以得到偏转与预载之间的关系;

2. 装好滚珠轴承和已知长度的间隔套筒, 以确定不同预载的参考值。

为记录轴承副的弹性特性 (为施加力函数的偏转曲线), 将轴承组不用内套筒和没有内迷宫式密封方式装配起来, 将一个滚珠放在压缩空气筒和滚珠轴承内环之间 (图10)。增加筒内的空气压力, 预载成比例增加。球位移用一个位移测量仪来确定, 其位移即为预载的函数。将轴承副的特性点画在图上 (为预载函数的轴承弹性偏转曲线见图11)。在所测得的轴承副弹性特性曲线上, 可以很简便地看出在给定距离变化中所引起的力变化。这样, 准确的预载可能在内迷宫式密封和外迷宫式密封距离 ΔS 值下得到 (见图12)。为测量在不同速度下为轴承弹性函数的马达功耗,

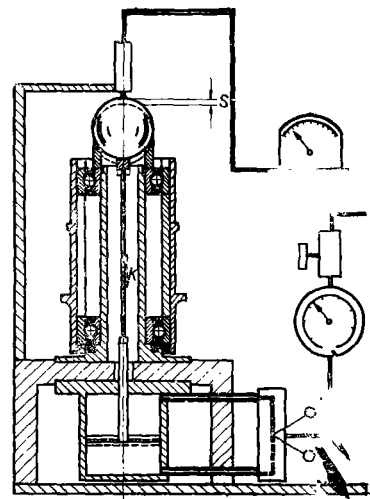


图10 使用压缩空气的预载试验装置。

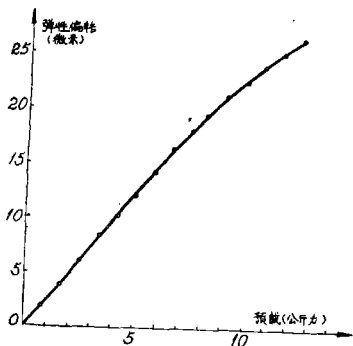


图11 为预载函数的弹性偏转曲线

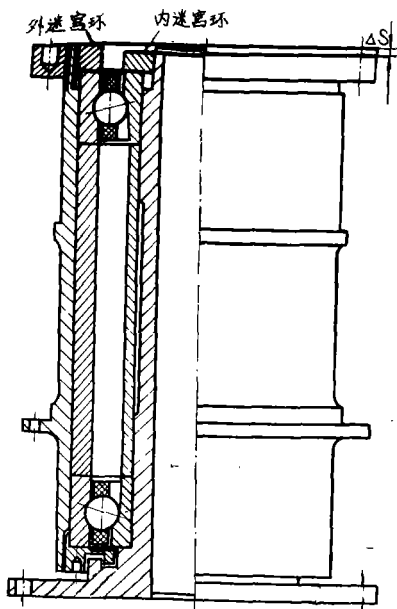


图12 用内、外迷宫式密封距离调预载的轴承组。

先使用图10的预载试验装置进行预载标定，然后用旋入内迷宫密封环来变化预载。为得到几个试验点，内环旋入到一定程度以达到如4、6、8、10和12公斤力等值的预载。再测量速度范围为1000至6000转/分的马达功耗（图13）从图13中可以看出，最小预载为3公斤力，最大预载为6公斤力处能避免摩擦力矩突增，优化预载平均为4.5公斤力，在4.5公斤力附近预载曲线平坦处是理想的预载范围。

八 求为速度函数的 轴承摩擦力矩

在速度变化时，摩擦力矩受以下几种因素影响即：1.滚珠的离心力；2.转动部分的凸起和接触角的变化；3.润滑油的粘附。先用间隔内、外套筒来调节优化预载值（图13中为 4 ± 1 公斤力），然后在室内条件下求在不同转速下的轴承摩擦力矩，其步骤为：

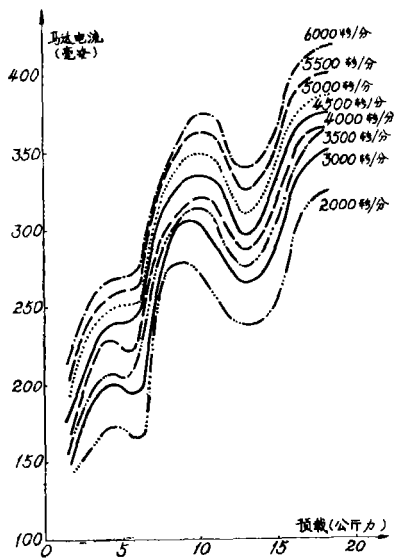


图13 为速度函数的轴承预载与马达电流关系图。

(1)从马达名牌中计算出马达的力矩常数 m_i ，此常数示马达电流和因之产生的马达力矩之间的关系。所得总力矩中包括轴承摩擦力矩、在马达中铁损力矩损失（涡流力矩、磁滞力矩等）、壳体内空气阻力矩等；

(2)从所测总力矩中减去马达损失力矩和壳体内空气阻力矩就获得为速度函数的轴承摩擦力矩，图14中曲线I示由马达电流计算出的总力矩，曲线II示马达损失力矩和壳体内空气阻力矩之和，曲线III示轴承摩擦力矩。在图中可以看出，当轴承转速增到4000转/分以后，当速度再增加时，由于在轴承中产生的热量减小，所使用的润滑油的粘滞摩擦下降。另外，轴承外环因温升和较高离

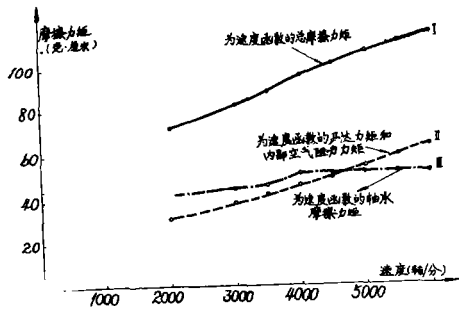


图14 为速度函数的摩擦力矩值。

心力而膨胀，这样，又重新造成接触角变化而降低轴承预载。又如飞轮中静止和转动部件之间的温度差也造成预载变化。

九 由于滚珠轴承的过润滑而造成摩擦力矩变化试验

设计润滑油存储器时，要考虑到使得当轴承开始运转以后，由于离心力使油脂由油脂室流出，而尼龙筒开始时是以一种不饱和状态装配的，慢慢地，被油脂室内的油饱和起来，转而开始将自由油分子送到滚珠轴承上去。试验轴承的过润滑是保证在跑合以后的轴承组没有摩擦力矩的不良变化，并储存在有足够的油量。试验方法是用一个喷射嘴将油喷入油脂室，油通过油脂室的小孔流入尼龙筒，饱和的尼龙筒输送多余的油到滚珠轴承上去，记录下驱动马达的电流。试验程序如下（见图15）

1. 经过120小时跑合以后，油经过喷射孔供到轴承上去，基于尼龙筒的设计原则，在起初至少还要有50%油量才能饱和，尼龙筒没有饱和以前，不能对轴承供油。当马达电流上升，供油停止，在马达电流降至跑合期后值以前不再供油；

2. 再增加供油，直到电流重新增加。在此时，就已供入了最大油量的97%。将轴承组进一步操作直到电流达到跑合期后的值，然后，轴承组停止运转；

3. 在室温下贮存40小时以后，轴承组

重新运转，这时轴承能毫无困难地立即启动。在一小时内，电流消耗达到在停下来以前得到的值。以后，再供给附加的油，直到觉察到有另一个电流峰值，在此“过润滑”状态中，立即停止轴承运转；

4. 在室温下储存45小时以后，轴承能无困难地启动，在以后几天内，马达电流增加，在整个试验122天以后，试验结束。

为得到润滑油分布分析情况，拆开轴承组并且秤所有部件的重量，得出以下结果，即：60%的输入油量保持在尼龙筒中，4.5%在下轴承，17.5%在上轴承，10%溅在转动部件上，8%存在静止部件上，试验的结论是：即使在过润滑状态中，轴承也能正常运转，并有平稳启动。在与上述试验同时，一个轴承组在-15℃下保存，此轴承组在装配时供入正常的润滑量。此轴承组在启动时也没有困难，就是启动时间长一点。在此试验中也保证了轴承组设计中允许在轴承组内存在着余量的油。在壳体有裂纹时，储存油蒸发，并且以气体形式供给润滑油。

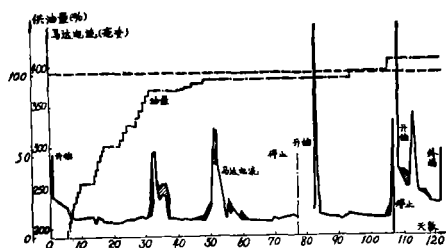


图15 为时间函数的供油量和马达电流关系图

十 对姿态控制飞轮环境模拟试验条件的特殊要求

环境模拟试验对于卫星在发射和运行过程中的可靠性是十分重要的。由于姿态控制飞轮是在姿态仓中按装的，所以在环境模拟试验要求上也有所不同

1. 在卫星发射过程中，飞轮受着火箭头部和卫星的保护，不直接受噪音压力的干

扰破坏, 而仅承受由刚体支架传递的随机振动影响, 所以只进行随机振动试验, 而不进行噪音试验;

2. 由于在 1×10^{-5} 托以上超高真空下壳体漏率差值很小, 所以在热真空试验中只进行 1×10^{-6} 托的超高真空试验;

3. 由于姿控仓的保护, 在热真空试验中只进行 -15°C — $+55^{\circ}\text{C}$ 的温度试验;

4. 为了解反作用飞轮在不同速度下的特性, 所以在寿命试验中要将飞轮由 $+3000$ 转/分通过零点再至 -3000 转/分再由 -3000 转/分通过零点到 $+3000$ 转/分, 每周期共22小时左右。

5. 姿控飞轮必须在气浮三轴转台上通过最后姿控试验。

参 考 文 献

- [1] 近代姿态控制反作用飞轮 干东英
“光学机械”1980年第6期
- [2] Qualification and life testing of

a ball-bearing flywheel.
Final report by TELDIX GmbH,
Heidelberg, Germany November.
1974

- [3] Further testing and design improvement of grease bearing flywheel.
Final report of work carried under ESTEC contract (ESRO)1975.
- [4] Thermal vacuum qualification tests on a Teldix double-gimballed momentum wheel
Final report by TELDIX GmbH,
Heidelberg, Germany 1975.
- [5] Components for space application
Teldix Heidelberg May 1977
- [6] 空间科学技术参考资料汇编
中国科学院自动化所情报资料室
1978.6.